

СТРУКТУРА ЭЛЕКТРОВЗРЫВНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ $\text{TiB}_2\text{-Ni}$ ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ²

Романов Д.А.

проф., д.ф.-м.н., Громов В.Е.

Сибирский государственный индустриальный университет,

г. Новокузнецк

romanov_da@physics.sibsiu.ru

Проведено модифицирование высокоинтенсивным электронным пучком электровзрывных композиционных покрытий системы $\text{TiB}_2\text{-Mo}$. Выполнены исследования фазового и элементного состава поверхностного слоя стали Hardox 450, подвергнутого электровзрывному напылению композиционного покрытия из несмешивающихся системы $\text{TiB}_2\text{-Mo}$ и последующему облучению высокоинтенсивным электронным пучком субмиллисекундной длительности воздействия. Выявлены режимы электронно-пучковой обработки, позволяющие формировать плотные, с зеркальным блеском поверхностные слои, обладающие субмикроструктурной структурой на основе диборида титана и молибдена.

Композиционные материалы систем $\text{TiB}_2\text{-Mo}$ и $\text{TiB}_2\text{-Ni}$ обладают высокой износостойкостью [1]. Покрытия такого состава могут быть сформированы методом электровзрывного напыления (ЭВН), который позволяет получать высококачественные беспористые покрытия, [2–5]. Одной из областей применения этого метода является модификация поверхностных слоев материалов электротехнического назначения. Метод позволяет наносить покрытия из продуктов взрыва проводников, а при добавлении в область взрыва порошковых навесок различных веществ – осуществлять формирование композиционных покрытий, обладающих адгезией с основой на уровне когезии и высокими функциональными свойствами.

Перспективным направлением развития способов ЭВН композиционных покрытий является их модифицирование высокоинтенсивными электронными пучками [6]. Высокая энергетическая эффективность и однородность плотности энергии по сечению потока, хорошая воспроизводимость импульсов и высокая частота их следования позволяют использовать импульсные электронные пучки в технологических целях. Они используются для снижения шероховатости поверхности

²Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 13-02-12009 офи_м, госзаданий Минобрнауки №№ 2708 и 3.1496.2014/К на выполнение научно-исследовательской работы

покрытий, их гомогенизации и наноструктурирования, повышения износостойкости, твёрдости путем импульсно-периодического переплавления и последующего высокоскоростного охлаждения путем отвода тепла в объем подложки. Цель настоящей работы заключалась в модифицировании высокоинтенсивным электронным пучком электровзрывных композиционных покрытий системы TiB_2 -Mo и изучении их структуры.

Материалы и методика исследования

Электровзрывное напыление покрытий проводили на модернизированной электровзрывной установке ЭВУ 60/10М, которая описана в работе [7]. Она включает емкостный накопитель энергии и импульсный плазменный ускоритель, состоящий из коаксиально-торцевой системы электродов с размещенным на них проводником, разрядной камеры, локализирующей продукты взрыва и переходящей в сопло, по которому они истекают в вакуумную технологическую камеру с остаточным давлением 100 Па. Электровзрыв происходит в результате пропускания через проводник тока большой плотности при разряде накопителя.

Покрyтия наносили на образцы стали Hardox 450 с размерами 15×15×5 мм. Режим термосилового воздействия на облучаемую поверхность задавали выбором зарядного напряжения емкостного накопителя энергии установки, по которому рассчитывали поглощаемую плотность мощности [7]. Электровзрывное напыление проводили с использованием композиционного электрически взрываемого проводника [8] для нанесения покрытий, который в данной работе представлял собой двуслойную молибденовую фольгу с заключенной в ней навеской порошка диборида титана. Поглощаемая облучаемой поверхностью плотность мощности при напылении составляла 4,5 ГВт/м², диаметр молибденового сопла разрядной камеры плазменного ускорителя – 20 мм, расстояние образца от среза сопла – 20 мм. Массы фольги и порошковой навески были одинаковы и составляли 530 мг.

Модифицирование поверхности электровзрывных покрытий осуществляли высокоинтенсивным электронным пучком, позволяющим переплавлять поверхностный слой покрытия с последующим высокоскоростным охлаждением за счет отвода тепла в объем материала. Использовали установку «СОЛО» Института сильноточной электроники Сибирского отделения РАН [6]. Режимы электронно-пучковой обработки (ЭПО) представлены в таблице 1.

Сканирующую электронную микроскопию осуществляли с использованием растрового электронного микроскопа CarlZeiss EVO50, оснащенного приставкой для рентгеноспектрального анализа. Перед микроскопическими исследованиями шлифы подвергали химическому травлению 3%-ным раствором азотной кислоты в этиловом спирте.

Результаты исследования и их обсуждение

Исследования поверхности композиционных электровзрывных покрытий системы TiB₂-Mo показали, что обработка электронным пучком приводит к преобразованиям поверхностного слоя покрытий. На поверхности центральной части зоны оплавления покрытий пучком электронов (область, диаметр которой увеличивается от 10 мм при плотности энергии пучка электронов 45 Дж/см² до 20 мм при 60 Дж/см²) исчезают наплывы и микрократеры, уменьшается количество микротрещин, рельеф поверхности выравнивается. Вместе с тем, формирующаяся структура поверхностного слоя остается неоднородной.

При ЭПО по режиму 1 обнаруживаются три основных типа структурных элементов. Области первого типа – это сравнительно гладкие области, образованные ячейками высокоскоростной кристаллизации. Размер ячеек изменяется в пределах от 200 до 500 нм. Эти области занимают основную площадь обработанной поверхности материала. Области второго типа, судя по результатам микрорентгеноспектрального анализа, содержат частицы диборида титана, вдоль границ скоплений которых формируется ячеистая структура образованная молибденом, размеры ячеек которой изменяются в пределах от 200 до 300 нм. Области третьего типа сформированы частицами диборида титана сферической формы, расположенными в молибденовой матрице. Частицы диборида титана в этих областях имеют размер 0,5...5 мкм. Таким образом, ЭПО покрытия в режиме 1 не приводит к гомогенизации поверхностного слоя покрытия, который остается структурно- и фазово неоднородным.

Облучение покрытий электронным пучком по режимам 2 и 3 повышает уровень гомогенности поверхностного слоя покрытий. Выполненные исследования позволили выявить области материала со следами гидродинамического течения расплава на поверхности (рис. 4, а). Следуя предложенной выше классификации, их можно отнести к областям первого типа. Ячеистая структура областей первого типа, характерная для высокоскоростной кристаллизации имеет размер ячеек, изменяющийся в пределах от 100 до 150 нм. Обнаруживаются также и области второго типа. Размеры зерен в этом случае изменяются в пределах от 0,1 до 0,7 мкм. Области третьего типа после ЭПО также присутствуют, но выявляются в незначительном количестве.

После облучения поверхности ЭВН электронным пучком по режиму 4 выявлены особенности структуры областей второго и третьего типа. А именно, в зернах областей второго типа наблюдается формирование структуры дендритной кристаллизации. При этом размеры частиц диборида титана, расположенных по границам и в стыках границ зерен, а также их количество существенно увеличивается, а содержание молибдена уменьшается. Уменьшается содержание молибдена и в структуре областей третьего типа.

После облучения поверхности ЭВН электронным пучком по режиму 5 структурные составляющие поверхностного слоя покрытия незначительно отличаются от структуры поверхности покрытия после ЭПО по режиму 1. Это обусловлено тем, что по поглощаемой плотности мощности он является самым слабым.

Микрорентгеноспектральный анализ и анализ структурных составляющих, формирующихся на поверхности покрытия, показал, что в процессе ЭПО электровзрывных покрытий перекристаллизация диборида титана с образованием других соединений не происходит.

Следовательно, увеличение плотности энергии пучка электронов от 45 до 60 Дж/см² приводит к снижению концентрации молибдена от 50 до 45 ат. % в поверхностном слое композиционного электровзрывного покрытия системы TiB₂-Мо и обогащение диборидом титана, что может быть обусловлено испарением молибдена с поверхности облучения.

Как следует из анализа изображения структуры поперечных шлифов, толщина модифицированного слоя после ЭПО изменяется в пределах 30–50 мкм и незначительно увеличивается с ростом плотности энергии пучка электронов. Плавление модифицированного слоя электронным пучком приводит к полному устранению дефектов в виде кратеров, обусловленных попаданием в расплав частиц порошковой навески диборида титана. Электронно-пучковая обработка сопровождается плавлением электровзрывного покрытия и приводит к формированию слоистой структуры. Независимо от режима обработки после ЭПО в покрытии формируется преимущественно композиционная наполненная структура, различающаяся степенью дисперсности частиц диборида титана 0,1...2 мкм, причем крупные включения размером 0,5...2 мкм составляют 5...7 % от объема всех включений. Таким образом, частицы диборида титана в электровзрывном покрытии после ЭПО более дисперсны, чем в слое, незатронутом ЭПО. В последнем формируется структура смешанного типа – наряду с включениями в молибденовой матрице частиц диборида титана размером 1...5 мкм локально формируются области размером 30...150 мкм.

Выводы

1. Объемное соотношение металлического компонента (молибдена) и частиц порошка диборида титана в композиционных покрытиях соответствует их соотношению в композиционном электрически взрываемом проводнике, используемом для напыления.

2. После ЭПО электровзрывных композиционных покрытий системы TiB₂-Мо на поверхности выделены три характерные морфологические составляющие структуры, формирующие микрорельеф покрытий: сравнительно гладкие области, образованные ячейками высокоскоростной кристаллизации с размером ячеек от 200 до 500 нм; области, содержащие частицы диборида титана; области, сформированные частицами диборида титана сферической формы, расположенные в молибденовой матрице.

3. Структура поперечных сечений покрытий не содержит пор и представляет собой молибденовую матрицу с включениями диборида титана, размеры которых изменяются в пределах от 0,5 до 2,5 мкм. Диборид титана и молибденовая связка распределены по объему покрытий примерно в равном соотношении. В процессе ЭПО электровзрывных покрытий перекристаллизация диборида титана с образованием других соединений не происходит.

4. В покрытиях системы $\text{TiB}_2\text{-Mo}$ локально формируются боридные сетки размером 30...150 мкм.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. Zhang J., Fu Z., Wang W., Wang H. Microstructure and mechanical Properties of $\text{TiB}_2/(\text{Ni+Mo})$ composites fabricated by hot pressing // J. Mater. Sci. Technol. – 2000. – Vol. 16. – No. 6. – P. 634–636.

2. Budovskikh E.A., Gromov V.E., Romanov D.A. The Formation Mechanism Providing High-Adhesion Properties of an Electric-Explosive Coating on a Metal Basis // Doklady Physics – 2013. – Vol. 58. No. –3. – P. 82–84.

3. Romanov D.A., Budovskikh E.A., Gromov V.E. Surface Relief and Structure of Electroexplosive Composite Surface Layers of the Molybdenum-Copper System // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques – 2011. – Vol. 5. – No. 6. – P. 1112–1117.

4. Surface modification by the EVU 60/10 electroexplosive system / D.A. Romanov, E.A. Budovskikh, Yu. D. Zhmakin, V.E. Gromov // Steel in translation. – 2011. – Vol. 41. – No. 6. – P. 464–468.

5. Electroexplosive boron-copper plating and subsequent electron-beam treatment of steel 45 / E.S Vashchuk, D.A. Romanov, E.A. Budovskikh, Yu.F. Ivanov // Steel in translation. – 2011. – Vol. 41. – No. 6. – P. 469–474.

6. Formation of Surface Layers in Cu-C System / Yu. Ivanov, A. Teresov, O. Ivanova et al. // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 1013. – P. 224–228.

7. Электровзрывное напыление износо- и электроэрозионностойких покрытий / Д. А. Романов, Е. А. Будовских, В. Е. Громов, Ю. Ф. Иванов. – Новокузнецк: Изд-во ООО «Полиграфист», 2014. – 203 с.

8. Патент РФ № 2478732 на изобретение «Композиционный электрически взрываемый проводник для электровзрывного напыления покрытий или электровзрывного легирования поверхности металлов и сплавов» / Романов Д.А., Будовских Е.А., Громов В.Е.; заявл. 13.09.2011; опубл. 10.04.2013, Бюл. № 10. 8 с.